

琵琶湖・淀川水系において各種排水処理水が ふん便性細菌汚染に与える負荷影響の評価について

大阪府立公衆衛生研究所 奥村早代子

1. はじめに

河川水における安全性の確保は公衆衛生上の課題であるが、種々の水中の病原微生物の検出と確定には一般的に高度な専門知識・技術が必要であり、また、検査が煩雑で長時間を要することから現実的ではない。病原微生物が人畜の腸管由来である場合が多いことから、水環境ではふん便汚染指標細菌を用いて対応が行われている¹⁾。

河川におけるふん便汚染指標細菌の排出源については、下水道、浄化槽、野生動物、家畜排水処理施設などが考えられるが、それらが河川水質に及ぼす影響については、流域の生活排水処理状況と排出負荷量の推定等から大部分を浄化槽が占めていると考察するもの²⁾があるが、実際に調査したものはほとんどない。

また、ふん便汚染指標細菌に関しては、大腸菌群等の指標微生物は水環境中では変動が大きく、河川流量と正の相関が認められていることや、降雨が多い夏期の方が冬期よりも高い傾向のあること^{3,4)}、また、環境中での増殖の可能性^{5, 6, 7)}などの報告もある。

本研究では、琵琶湖淀川水系の上流域において、浄化槽から排出されるふん便汚染指標細菌が河川に与える影響について考察することを目的に、浄化槽処理水と、浄化槽面整備地域の中心部を流れる河川について、浄化槽処理水が流入する前の上流と流入後の下流のふん便指標細菌濃度を調査した。浄化槽処理水の季節的なふん便指標細菌濃度変化を確認するために、3基の浄化槽を約1年間調査した。さらに、地域浄化槽からの排出細菌量を試算し河川濃度への影響について考察するために地域内の浄化槽のおよそ35%について実態調査を行った。

さらに猪名川に放流される下水処理水と、下水処理水が流入する前後の河川地点、そして大規模流域河川である淀川の下流地点のふん便指標細菌数の調査を実施した。

2. 調査方法

調査は平成28年4月～29年2月までの11ヵ月間に毎月1回、午前中に行った。

2.1 採水地点

河川と採水地点の様子を図1に、浄化槽面整備地域の浄化槽整備と採水地点の様子を図2に示す。浄化槽面整備地域は、淀川水系の猪名川の支流である箕面川の上流に位置しており、この地域の浄化槽を調査対象とした。

河川の調査地点は、浄化槽面整備地域の上流(A1)と下流(A2)、下水処理水が流入するより上流として猪名川の軍行橋(B1)、2カ所の下水処理水の流入より下流に位置する利倉橋(B2)、大規模流域河川である淀川の下流地点の豊里大橋(C)で行った。

下水処理水は、B1とB2の間に放流が行われている2カ所の下水処理場(G1、G2)で行った。

2.2 浄化槽の運転状況と調査概要

浄化槽は平成 11～12 年度に主に整備され約 20 年が経過したものである。浄化槽の管理は市町村が実施しており、3 ヶ月に 1 回の保守点検（3, 6, 9, 12 月に実施）と 1 年に 1 回以上の清掃が行われている。

58 基の浄化槽が稼働中で、生物ろ過方式が 11 基、接触ばっ気方式が 47 基である。

浄化槽放流水の経時変化を確認するために、主に設置されている 3 つの型式について 1 基ずつ（生物ろ過方式 J1、接触ばっ気方式 J2, J3）、4 月または 5 月～2 月までの 10～11 ヶ月間調査した。また、浄化槽全体の負荷を求めるために、期間中 1 回の調査を 18 基（生物ろ過方式 4 基、接触ばっ気方式 14 基）で行った。



図1 河川と採水地点の様子



図2 浄化槽面整備地域と採水地点の様子

2.3 採水方法

河川水のサンプリングは、A1、A2 地点は滅菌瓶に直接採水した。B1 地点と C 地点はステンレス製バケツ、B2 地点はステンレス製杓を用いて採水し、滅菌瓶に採取した。ただし、B2 地点では残留塩素が確認されたので、12 月からの 3 ヶ月間チオ硫酸ナトリウム入り滅菌瓶に採取した。

浄化槽処理水は、浄化槽のマンホールを開け、滅菌済み採水瓶（200mL）を用いて消毒槽上部から数回くみとって 2L 滅菌済み容器に採取して攪拌混合し、チオ硫酸ナトリウム添加滅菌容器（500mL）2 本に分取した。2L 容器に残った処理水を用いて残留塩素を測定（DPD 比色法 SIBATA 製残留塩素測定器）した。

下水放流水は、下水処理場内の塩素混和後の消毒設備からステンレス製バケツでくみ上げ、残留塩素消去用のチオ硫酸ナトリウムを添加した 500mL 滅菌容器に分取した。バケツに残った処理水の残留塩素を測定した。

採水した試料は冷蔵で持ち帰り、その日のうちに細菌試験を行った。

2.4 測定項目と測定方法

ふん便指標細菌として、大腸菌群、大腸菌、ふん便性大腸菌群、ふん便性連鎖球菌、腸球菌を検査した。検査に用いた測定方法を表 1 に示す。腸球菌はテストキット取り扱い説明書に準じて、それ以外は下水試験方法 2012 年版に準拠して行った。

大腸菌群および大腸菌は、特定酵素基質法最確数法（5 本法）で測定した。希釈には滅菌蒸留水を用いた。青色発色したものを大腸菌群、ブラックライト照射による青白蛍光を発したものを大腸菌陽性とした。

ふん便性大腸菌群は M-FC 法により、青色で光沢あるコロニーを計数し、ふん便性連鎖球菌は M-エンテロコッカス法により桃色ないし深紅色のコロニーを計数した。滅菌メンブレンフィルターは直径 47mm、孔径 $0.45\mu\text{m}$ 、(Mixed Cellulose Esters ミリポア社)を用いた。ろ紙 2 枚の平均値を細菌数とした。ろ過試料は適宜 (100mL~1mL) 用いた。

腸球菌は検水 100mL を特定酵素基質法のエンテロラート法による Quanti-Tray/2000 により培養後の UV ランプによる青色蛍光発色セルを計数し、QT トレイ定量 MPN 表により最確数を出した。 $>2,419.6\text{MPN}/100\text{mL}$ については、 $2,420\text{MPN}/100\text{mL}$ として取り扱った。

培養の恒温はふん便性大腸菌群は $44.5\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ の水浴で行い、それ以外の検査項目は恒温器で行った。なお、水槽への浸漬は、ナイロン袋に入れたシャーレを加熱によるシール密封し、転倒した状態で培養した。

表 1 ふん便指標細菌の測定方法

測定項目	測定方法	計数方法	培養条件
大腸菌群	特定酵素基質培地 (ラウリル硫酸X-Gal/MUG エルメックス社)	MPN	36°C 24 h
大腸菌		MPN	36°C 24 h
ふん便性大腸菌群	m-FC寒天培地法、メンブレンフィルター使用 (Difco m FC Ager)	コロニー計測	44.5°C 24 h
ふん便性連鎖球菌	M-エンテロコッカス培地法、メンブレンフィルター使用 (Difco m Enterococcus Agar)	コロニー計測	36°C 48h
腸球菌	Enterolert法、QTトレイ使用 (Enterolertテストキット IDEXX社)	MPN	41°C 24 h

3. 結果と考察

3.1 浄化槽面整備地域の上流 (A1) と下流 (A2) のふん便指標細菌の経月変化

A1 と A2 の各種ふん便指標細菌濃度の経月変化を図 3 に示す。腸球菌は $>2419.6\text{MPN}/100\text{mL}$ となったもの (A1: 9 月) を $2420\text{MPN}/100\text{mL}$ として、大腸菌は $<1.8\text{MPN}/100\text{mL}$ (A2: 4 月) を便宜上 $1.0\text{MPN}/100\text{mL}$ として図示した。

A1 地点の各種細菌濃度は、大腸菌群、ふん便性連鎖球菌、腸球菌で夏期に増加する傾向を示した。A1 地点は浄化槽処理水の流入前であることから、これらのふん便汚染指標細菌は、浄化槽からの排出によらずに、夏期に増加する傾向となっていることが示唆された。

各種細菌濃度は、大腸菌群が $3.3\times 10^2\sim 7.0\times 10^4\text{MPN}/100\text{mL}$ 、ふん便性連鎖球菌が $1.6\times 10^1\sim 3.6\times 10^3\text{CFU}/100\text{mL}$ 、腸球菌は $2.0\times 10^0\sim >2.4\times 10^3\text{MPN}/100\text{mL}$ 、ふん便性大腸菌群は $9.0\times 10^0\sim 3.6\times 10^2\text{CFU}/100\text{mL}$ 、大腸菌が $1.3\times 10^1\sim 4.9\times 10^2\text{MPN}/100\text{mL}$ で

あった。大腸菌群は他の指標細菌よりも $10^1 \sim 10^3$ オーダー大きい値であった。

A2 地点の各種指標細菌濃度は A1 地点と大差なく、A1 地点濃度よりも小さいこともあった。経月変化のパターンも A1 地点とほぼ同様で、大腸菌群、ふん便性連鎖球菌、腸球菌は夏期に増加する傾向を示した。

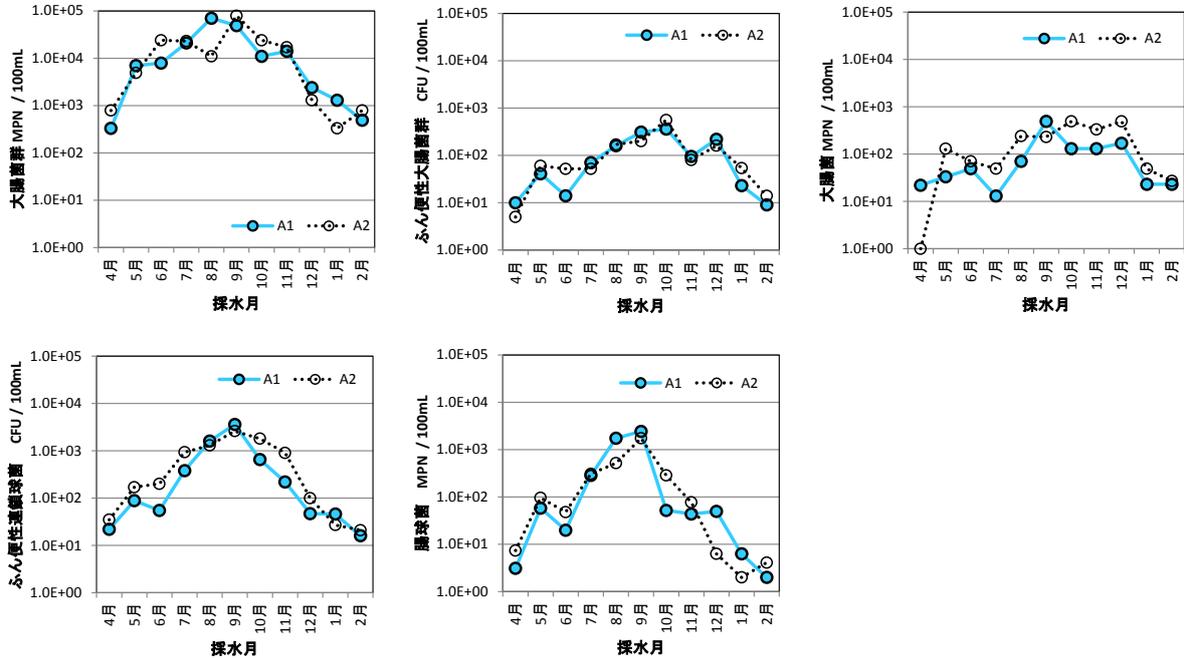


図3 A1 と A2 のふん便指標細菌濃度の経月変化

3.2 浄化槽処理水のふん便指標細菌の経月変化

3基の浄化槽の経月変化について、残留塩素濃度を図4に示す。調査期間中に清掃が行われており、データ間の線を削除して示した。残留塩素は簡易測定により行い、 $> 2.0 \text{ mg/L}$ については便宜上 2.5 mg/L として表示した。

残留塩素濃度は、浄化槽によってその差が大きく、 $J1 > J2 > J3$ となっていた。いずれの浄化槽も清掃直後の総残留塩素は検出上限濃度の 2.0 mg/L を越えていた。その後は、時間の経過とともに濃度が低下する傾向を示したが、保守点検実施により残留塩素が上昇することが観察された。

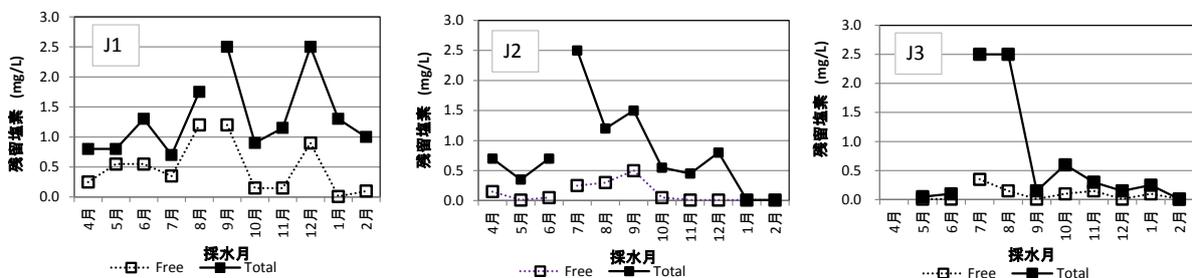


図4 浄化槽処理水の残留塩素濃度の経月変化

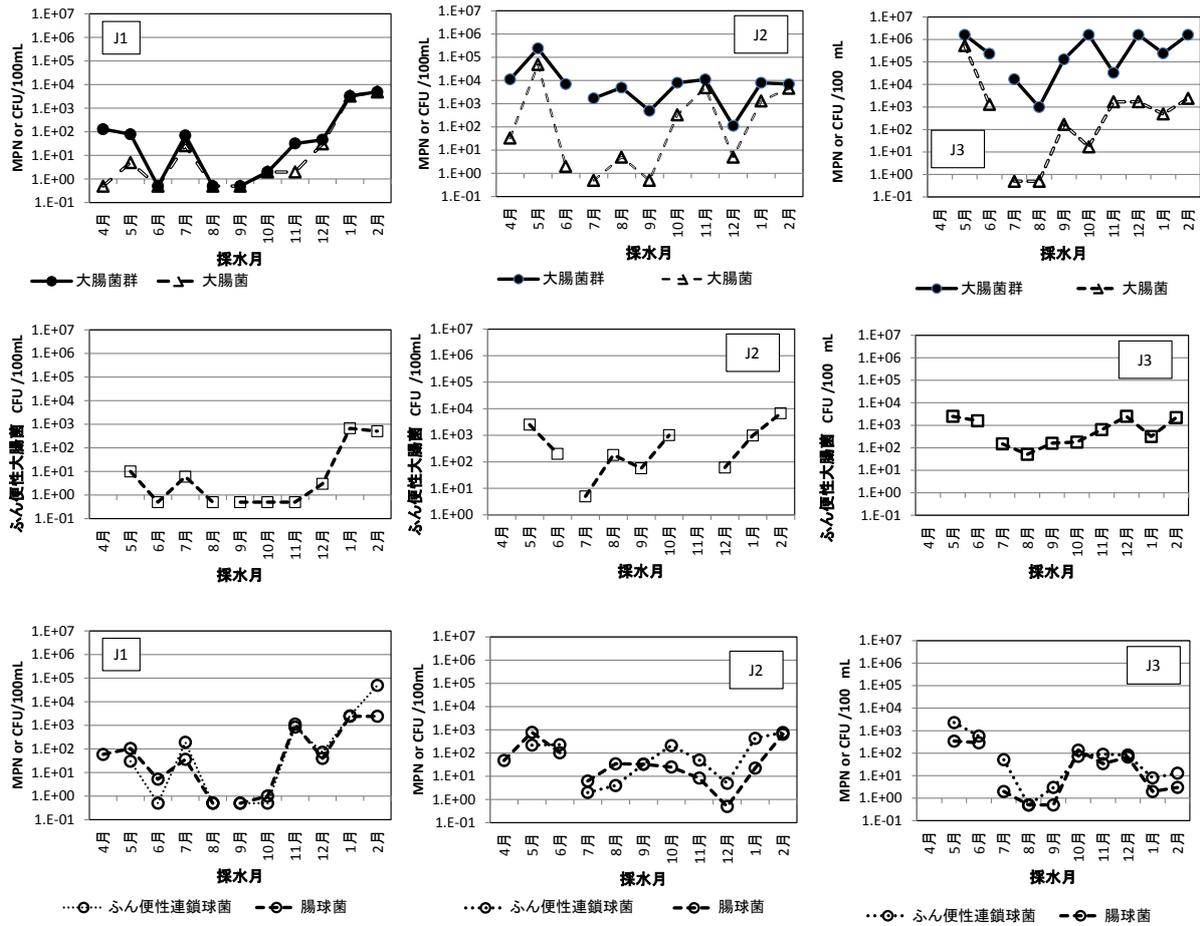


図5 浄化槽処理水のふん便指標細菌濃度の経月変化

浄化槽処理水の各種ふん便指標細菌濃度の経月変化（上段に大腸菌群と大腸菌、中段にふん便性大腸菌群、下段にふん便性連鎖球菌と腸球菌）を図5に示す。100mLについて検出限界未満（ <1 や <1.8 ）であったものについては便宜上 $0.5/100\text{mL}$ として図示した。また、J1の1月とJ2の5月のふん便性大腸菌群数は $>2,500\text{ CFU}/100\text{mL}$ を $2,500\text{ CFU}/100\text{mL}$ として、J3の12月と2月の大腸菌群は $>1,600,000\text{ MPN}/100\text{mL}$ を $1,600,000\text{ MPN}/100\text{mL}$ として、J1の1月と2月の腸球菌が $>2419.6\text{ MPN}/100\text{mL}$ については $2,420\text{ MPN}/100\text{mL}$ として図示した。J2の11月のふん便性大腸菌群数は、フィルター上に白色コロニーが多く計測できなかった。

調査した3基の浄化槽では、大腸菌群、ふん便性大腸菌群、大腸菌、ふん便性連鎖球菌、腸球菌のいずれの項目も、夏期に高い傾向はみられなかった。

浄化槽処理水の大腸菌は、3基の浄化槽すべてで、清掃後に不検出（ $<1.8/100\text{mL}$ ）となり、その後増加する傾向を示し、 10^3 オーダー/100mL となった。しかし、大腸菌群、ふん便性大腸菌群、ふん便性連鎖球菌、腸球菌については、浄化槽によってその傾向に差があり、生物ろ過方式のJ1は同様な傾向を示したが、接触ばっ気方式のJ2とJ3には、そのような傾向はみられなかった。

浄化槽処理水の各種ふん便指標細菌数は、大腸菌群は検出下限値未満～ $10^6/100\text{mL}$ の範囲で変動し、大腸菌、ふん便性大腸菌群、ふん便性連鎖球菌はおおむね、検出下限値未満～ $10^3/100\text{mL}$ の範囲で変動した。

3.3 浄化槽からの排出負荷の試算と河川への影響の検討

浄化槽からの排出負荷を試算するために浄化槽処理水のふん便指標細菌数を調査した。測定を実施する浄化槽は、法定検査で透視度が低かったものや、BODが高かったもの、実使用人員数が3以上のものを主に選定した。調査基数は、J1、J2、J3と同じ型式をそれぞれ4基、10基、4基の合計18基である。

排出量試算は、調査未実施の浄化槽については、調査浄化槽の型式別の50%値を、J1、J2、J3はそれぞれの50%値を用いた。計算に用いた根拠の一覧を表2に示す。排出細菌量の計算には、検出下限値以下は0.5/100mLとし、>3,000等は3,000として取り扱った。

排出量（個/日）の計算は式（1）によって行った。

表2 浄化槽排出量計算に用いた細菌数と水量

項目	大腸菌群	ふん便性 大腸菌群	大腸菌	ふん便性 連鎖球菌	腸球菌	水量	
単位	MPN or CFU /100mL					m ³ /日	
生物ろ過方式	J1 (50%値)	46	2	2	51	40	0.80
	J 1-2	<1.8	<1	<1.8	<1	<1	0.27
	J 1-3	140	14	49	<1	3	0.21
	J 1-4	790	49	79	42	27	0.85
	J 1-5	130,000	9,500	79,000	4,900	1,000	1.07
	J1型の50%値	140	32	49	42	27	2.42
接触ばっ気方式	J2 (50%値)	7,000	200	33	130	25	1.14
	J 2-2	<1.8	<1	<1.8	<1	1	0.23
	J 2-3	33,000	210	240	160	38	0.54
	J 2-4	33,000	>3,000	33,000	1,400	980	0.76
	J 2-5	54,000	1,300	2,400	2,600	>2,420	0.56
	J 2-6	120,000	13,000	46,000	2,800	>2,420	0.68
	J 2-7	130,000	13,000	13,000	5	11	0.25
	J 2-8	170,000	>3,000	33,000	4,400	>2,420	1.26
	J 2-9	170,000	3,900	24,000	160	30	0.81
	J 2-10	350,000	200	330	40	29	1.10
	J 2-11	540,000	>5,000	4,900	330	32	0.65
	J2型の50%値	120,000	3,000	4,900	160	38	9.76
	J3 (50%値)	235,000	480	815	51	30	0.59
J3-2	40	5	4	5	3	0.90	
J3-3	18,000	1,300	3,300	230	1,046	1.14	
J3-4	>1,600,000	>25,000	130,000	3,100	>2,420	0.85	
J3-5	>1,600,000	160	230	7,900	>2,420	0.84	
J3型の50%値	233,000	480	895	230	1,046	4.01	

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (V_{Jn} \times B_{Jn} \times 10 \times 1000) \quad \text{式 (1)}$$

$f(x)$: 浄化槽排出量 (個/日)

V_{Jn} : 水道使用量 (m³/日)

B_{Jn} : 浄化槽放流水の各種ふん便指標細菌濃度 (MPN or CFU /100mL)

各浄化槽の水量は平成27年8月～28年7月までの年間水道使用量を365で除して1日あたりの水量として計算に用いた。各浄化槽の合計水量は約32m³/日であった。各種ふん便指標細菌の浄化槽処理水からの排出量の試算結果を表3に示す。

次に、河川への影響を検討するため、A1 地点の細菌量に対する浄化槽排出量の比を求めることとした。A1 地点の水量の調査ができなかったため、過去に調査^{8, 9)}した A1 地点の河川水量の 50% 値である 1,109m³/日を用いた。A1 地点の細菌量 (MPN or CFU / 日) は、式 (2) によって行った。

結果を表 4 に示す。浄化槽からの排出量/A1 地点の細菌量の比は A1 地点のふん便指標細菌濃度が低い場合にはその割合は大きく、比が 1 以上となる回数は、大腸菌が 10 回と多く、次いでふん便性大腸菌が 6 回と多かった。このことは、大腸菌は他の指標細菌よりも、浄化槽排出量が河川に及ぼす影響が大きい事を示していると考えられた。

表 3 浄化槽からの排出量試算結果

大腸菌群	ふん便性大腸菌群	大腸菌	ふん便性連鎖球菌	腸球菌
6.4E+10	9.0E+08	3.8E+09	2.8E+08	1.8E+08

単位：個/日

$$f(A1) = V(A1) \times B(A1) \times 10 \times 1000 \quad \text{式 (2)}$$

f(A1) : A1 地点の細菌量 (MPN or CFU/日)

V(A1) : A1 地点の水量 = 1,109 (m³/日)

B(A1) : A1 地点の各種ふん便指標細菌濃度 (MPN or CFU /100mL)

表 4 浄化槽排出量/A1 細菌数の比の経月変化

	大腸菌群	ふん便性大腸菌群	大腸菌	ふん便性連鎖球菌	腸球菌
4月	17.44	8.13	15.43	1.15	5.23
5月	0.82	1.98	10.29	0.29	0.28
6月	0.73	5.81	6.93	0.46	0.81
7月	0.27	1.16	26.11	0.07	0.06
8月	0.08	0.51	4.85	0.02	0.01
9月	0.12	0.26	0.69	0.01	0.01
10月	0.52	0.23	2.61	0.04	0.31
11月	0.41	0.86	2.61	0.12	0.37
12月	2.40	0.37	2.00	0.54	0.33
1月	4.43	3.53	14.76	0.55	2.57
2月	11.75	9.03	14.76	1.58	8.11

以上より、今回調査したふん便指標細菌の項目に関しては、A1 地点で大腸菌群、ふん便性連鎖球菌、腸球菌は夏期に増加傾向が見られた。このことから、これらのふん便指標細菌の夏季の細菌数の増加の原因は浄化槽排出由来でない影響が大きいと考えられた。

1 年を通じて A1 地点と A2 地点の各種ふん便指標細菌濃度には大きな差がなく、上流地点の濃度の方が高い場合があることから、調査実施時においては、浄化槽からの排出による影響は大きくないことが考えられた。その原因は明らかではないが、この地区の浄化槽処理水が河川にパイプなどで直接放流されるのではないため、河川に流達する細菌数が小さくなることが理由のひとつではないかと思われた。

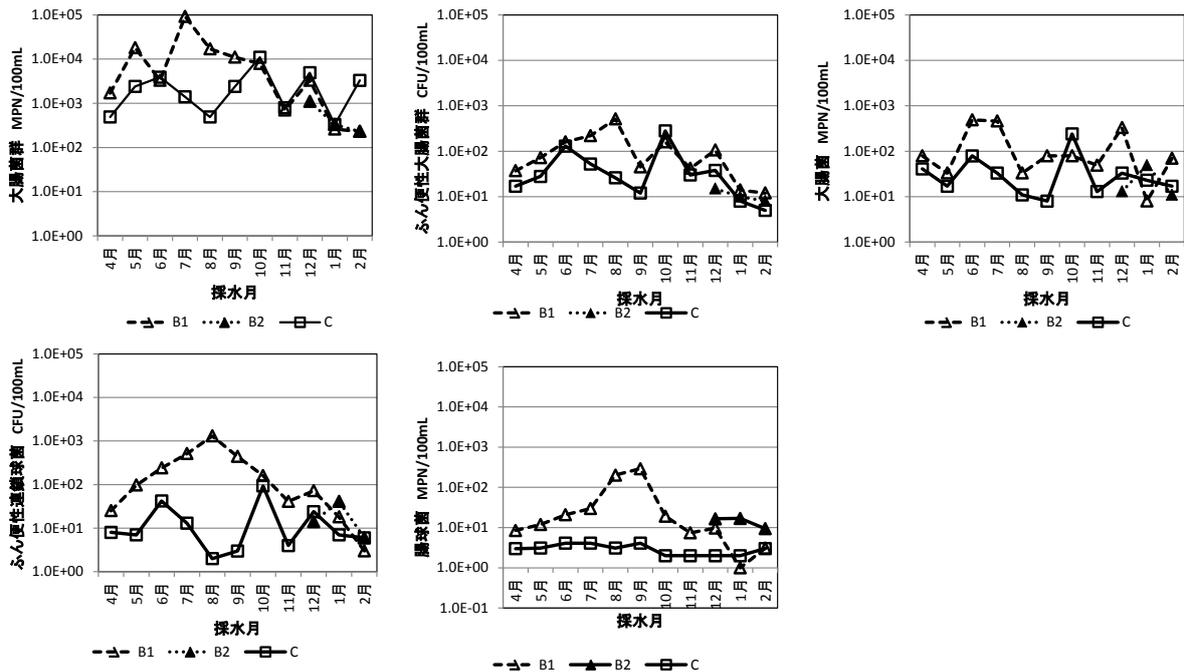


図 6 B1、B2、C 地点のふん便汚染指標細菌濃度の経月変化

3.4 B1、B2、C 地点の河川水のふん便指標細菌の経月変化

B1、B2、C 地点の各種ふん便汚染指標細菌の経月変化を図 6 に示す。B2 地点は 12 月から 2 月までの 3 ヶ月間の採水となったので、夏期の影響は確認できなかった。

B1 地点では大腸菌、ふん便性連鎖球菌と腸球菌でわずかに夏季に細菌数が高くなる傾向が見られたが、A 地点ほど顕著ではなかった。

C 地点は、どのふん便指標細菌も夏季に高くなる傾向は示さなかった。

3.5 下水処理水のふん便指標細菌の経月変化と河川に与える影響について

下水処理水 (G1、G2) の残留塩素濃度と各種ふん便指標細菌濃度の経過月変化を図 7 に示す。総残留塩素は G1 が 0.5~>2.0mg/L、G2 が 0.2~0.45mg/L であった。

各種ふん便指標細菌濃度は、G1 が、大腸菌群が $4.9 \times 10^1 \sim 3.3 \times 10^2$ MPN/100mL、ふん便性大腸菌群が $< 1 \sim 2.7 \times 10^1$ CFU/100mL、大腸菌が $< 1.8 \sim 1.3 \times 10^1$ MPN/100mL、ふん便性連鎖球菌が $< 1 \sim 4.1 \times 10^1$ MPN/100mL、腸球菌は $< 1 \sim 6.0 \times 10^1$ MPN/100mL であった。大腸菌群は他のふん便汚染指標細菌よりも $10^1 \sim 10^2$ オーダー大きい値であった。

G2 は G1 よりも $10^1 \sim 10^2$ オーダー大きい値であった。

各種ふん便指標細菌濃度は、いずれの処理場においても、低い濃度で安定しており、夏期に高い傾向はみられなかった。

下水処理水が河川に対する影響については、本調査で河川水量の測定ができおらず、国土交通省の水量データが今後公開されると見込まれることから、今後の検討課題としたい。

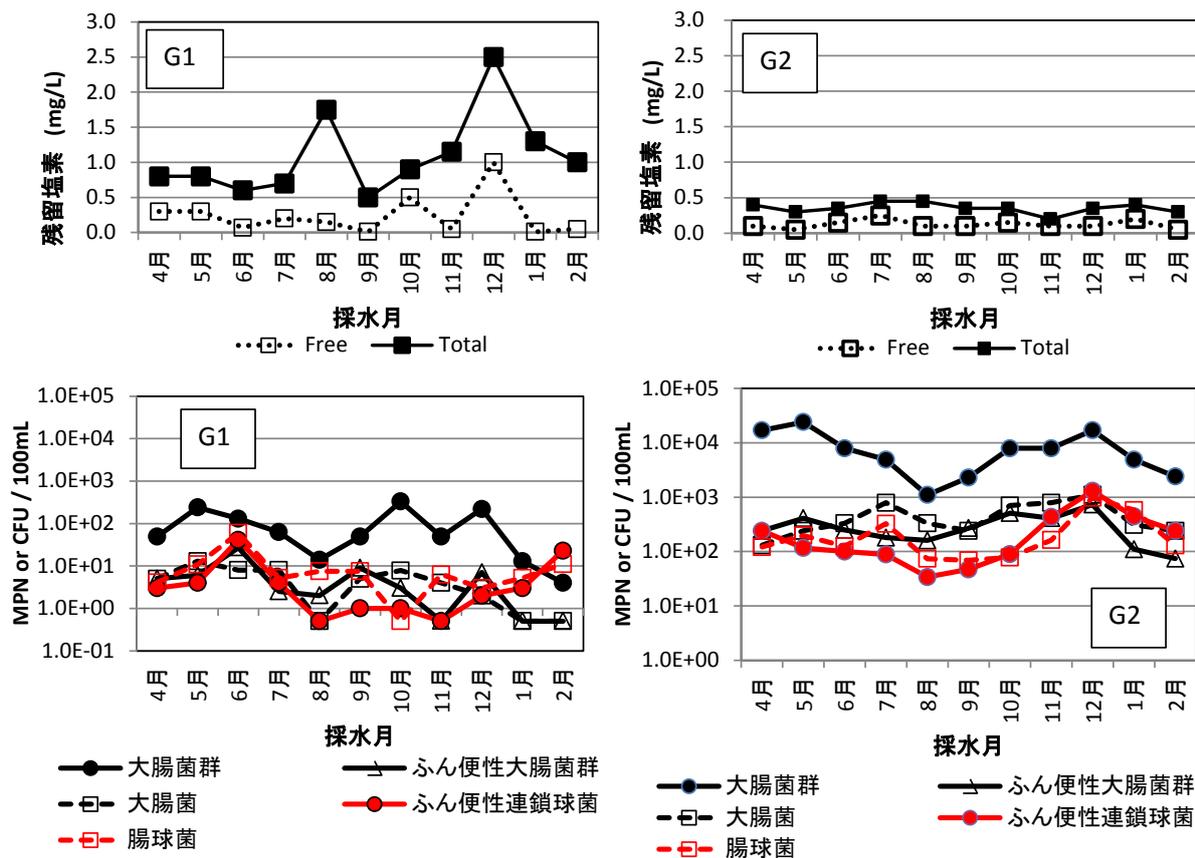


図7 下水処理水のふん便汚染指標細菌数の経月変化

4. まとめと今後の課題

本研究では、浄化槽処理水が河川のふん便指標細菌濃度に与える影響について検討するために、浄化槽整備地域の中心を流れる河川の上流と下流の各種ふん便指標細菌濃度の調査を行った。その結果、浄化槽処理水の影響を受けない地点の大腸菌群、ふん便性連鎖球菌、腸球菌は夏期に増加する傾向を示したことから、これらのふん便指標細菌は自然由来で増加していることが示された。

3基の浄化槽の通年調査では、総残留塩素は清掃後には、 $>2.0\text{mg/L}$ が観察され、その後保守点検後に上昇することも確認されたが、時間の経過とともに減少する傾向が確認された。また、残留塩素濃度は浄化槽による差が大きかった。浄化槽処理水のふん便指標細菌は、季節的な変化は示さなかった。また、大腸菌は3基全てで清掃後に低下し、その後上昇する傾向を示したが、その他の指標細菌では浄化槽により傾向が異なった。

地域の中央を流れる河川の下流の濃度は上流の濃度と差があまりなく、時には上流よりも小さい値となったこと、さらに、浄化槽排出細菌量の河川上流地点の細菌量に対する比が、月によって大きく変動することから、浄化槽からの排出が河川水のふん便指標細菌濃度に与える影響は小さいことが推測された。これは、浄化槽処理水が河川にパイプなどで直接放流されるのではないため、河川に流達する細菌数が小さくなるのが理由のひとつではないかと思われたが、それらの影響等については今後の課題である。

さらに、B1 地点では、大腸菌群、ふん便性連鎖球菌、腸球菌が夏期に増加する傾向はわずかにみられたが、A 地点のように顕著ではなく、C 地点ではそのような傾向を示さなかった。

下水処理水のふん便汚染指標細菌濃度は、季節による濃度変化傾向はなく、河川濃度に対する影響は、今後の課題としたい。

謝辞

本研究は、平成 28 年度 財団法人琵琶湖・淀川水質保全機構の「水質保全研究助成」による援助を受けて実施しました。また、本研究を遂行するに当たり、猪名川流域下水道事務所他の下水道の関係者の皆さまには調査にご協力をいただきました。水質分析を分担して下さいました公衆衛生研究所の肥塚利江主任研究員、枝川亜希子主任研究員、中野仁研究員、安達史恵研究員、採水と現地調査では公衆衛生研究所の山口進康総括研究員他、豊能町上下水道部の皆さまの協力を受けました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 岸田直裕:水環境中の大腸菌等の指標微生物, 水環境学会誌, **36(A)**, 165-168, (2013)
- 2) 上野加寿紀、和田桂子、宗宮功、廣谷博史:木津川上流の小河川におけるふん便汚染指標細菌の現状把握, 環境技術, **42**, pp489-494, (2013)
- 3) 和波一夫、石井真理奈、木瀬晴美:都内河川の大腸菌群数に関する研究(1)-多摩川の大腸菌群と大腸菌の挙動, 9-19, 東京都環境科学研究所報, 2010
- 4) Taku Koide, Masayo Furuya and Toru Iyo:Experimental study on the behavior of fecal contamination indicators on surface water sampled at Hanbara intake station., Japanese J. Water Treatment Biology, **38**, 3, 145-151, 2002
- 5) 石井裕一、和波一夫、木瀬晴美、安藤晴夫:東京湾流入河川の河口域における細菌学的水質調査, 東京都環境科学研究所報, 17-23, (2012)
- 6) 石井淑大、来栖太、春日郁郎、片山浩之、古米弘明:都市河川水中における大腸菌の増殖と溶存有機物質との関係, 第 50 回日本水環境学会年会ポスター発表, (2016)
- 7) 中野仁:浄化槽処理水の大腸菌群と大腸菌の環境中での消長, 大阪府立公衆衛生研究所研究報告, **54**, 64-69, (2016)
- 8) 山本康次、中野仁、奥村早代子、河合茂、木村直昭、増田ゆり、藤本久夫、山内正洋、信田英美代、板倉広幸:高山地区における個別処理浄化槽の面整備による生活排水の処理とその効果, 大阪府立公衆衛生研究所研究報告, **37**, 27-34, 1999
- 9) 奥村早代子、山本康次、中野仁、河合茂、木村直昭、増田ゆり、藤本久夫、石垣孝市、中島康勝、信田英美代、板倉広幸、泊進:高山地区における個別処理浄化槽の面整備による生活排水の処理とその効果(第 2 法), 大阪府立公衆衛生研究所研究報告, **38**, 33-41, 2000